سال سی وسه، شمارهٔ دو، ۱٤۰۰(۹۳- ۱۰٤)
DOI: 10.22067/jacsm.2022.75307.1097

شبیه‌سازی عددی رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای سلول خورشیدی گالیوم- آرسناید*

مقاله پژوهشی

پویا مختاری[۱] فرهاد حاجی‌ابوطالبی[۲] حمید بهشتی[۳] محمدرضا اشرف خراسانی[٤]

چکیده *سلول‌های خورشیدی فضایی معمولاً از جنس گالیوم- آرسناید ساخته می‌شوند و کاربرد بسیار زیادی دارند. آرایه‌های فوتوولتاییک، الکتریسیتهٔ پایدار و تجدیدپذیری را تولید می‌کنند که عمدتاً در موارد عدم وجود شبکهٔ انتقال و توزیع الکتریکی کاربرد دارند. مشابه یک کامپوزیت لایه‌ای، سلول‌های خورشیدی از لایه‌های مختلفی مانند لایهٔ شیشه‌ای، لایهٔ شفاف، لایهٔ سیلیکون منفی و لایهٔ سیلیکون مثبت تشکیل می‌گردند. لایهٔ شیشه‌ای یکی از مهم‌ترین لایه‌های تشکیل‌دهندهٔ سلول خورشیدی است که در معرض مستقیم تابش انرژی خورشید قرار می‌گیرد و در طی یک شبانه‌روز تغییرات دمایی زیادی را تجربه می‌کند. به‌دلیل متفاوت بودن ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های مختلف، به‌وجود آمدن ترک در لایهٔ شیشه‌ای امری محتمل است. وجود یک یا چند ترک اولیهٔ میکروسکوپی در این لایه و گرادیان شدید دمای محیط منجر به رشد ترک و در نتیجه شکست یا تخریب لایهٔ شیشه‌ای و هم‌چنین عملکرد نادرست سلول خورشیدی خواهد گردید. در این تحقیق رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای سلول خورشیدی به‌روش اجزای محدود توسعه‌یافته شبیه سازی می شود و تأثیر طول، مکان و زاویهٔ ترک اولیه و هم‌چنین ضخامت و ابعاد لایه بررسی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی آشکار می‌کند که از بین پارامترهای فوق، ابعاد لایهٔ شیشه‌ای محافظ بیشترین تأثیر را در رشد ترک دارد.*

واژه‌های کلیدی سلول خورشیدی گالیوم- آرسناید، تغییرات دمایی، رشد ترک، روش اجزای محدود توسعه‌یافته.

مقدمه

سلول خورشیدی یک قطعهٔ الکترونیکی حالت جامد است که توسط اثر فیزیکی- شیمیایی فوتوولتاییک، مستقیماً درصدی از انرژی نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. سلول‌های خورشیدی فضایی عمدتاً از جنس گالیوم- آرسناید ساخته می‌شوند و سلول‌های تکی، برای فراهم کردن توان لازم دستگاه‌های کوچک‌تر مانند ماشین حساب الکترونیکی به‌کار می‌روند. آرایه‌های فوتوولتاییک، یک جریان الکتریسیتهٔ تجدیدپذیر و پایدار تولید می‌کنند که در ماهواره‌ها، کاوشگرهای فضایی و ساختمان‌های مخابراتی دور از دسترس استفاده می‌گردند. به‌علاوه، استفاده از این نوع انرژی در محل‌هایی که شبکهٔ توزیع نیز موجود است، به‌منظور کمک به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط زیست مرسوم شده‌است [1]. امروزه با پیشرفت علم در زمینه‌های مختلف، نیاز روزافزون به انرژی و درنتیجه تأمین انرژی مورد نیاز از منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر دارای اهمیت فراوانی است. یکی از این

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۱۱/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۱/۱۵می‌باشد.
(۱) کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان.
(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان.
(۳) دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان.
(٤) مربی، مهندسی مکانیک، پژوهشکدهٔ مواد و انرژی اصفهان.
Email: f.hajiaboutalebi@eng.ui.ac.ir

منابع که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، انرژی خورشیدی است. خورشید در هر ثانیه هزار ژول انرژی به هر متر مربع از سطح زمین منتقل می‌کند که با جمع‌آوری آن می‌توان انرژی مورد نیاز را تأمین کرد [2].

مشابه یک کامپوزیت لایه‌ای، سلول‌های خورشیدی از لایه‌های مختلفی مانند لایهٔ شیشه‌ای، لایهٔ شفاف، لایهٔ سیلیکون منفی و لایهٔ سیلیکون مثبت ساخته می‌شوند. مهم‌ترین لایهٔ تشکیل‌دهندهٔ سلول خورشیدی، لایهٔ شیشه‌ای است که به‌طور مستقیم تحت تابش انرژی خورشید قرار می‌گیرد و در طی یک شبانه‌روز تغییرات دمایی زیادی را تجربه می‌کند. متفاوت بودن جنس لایه-های مختلف و درنتیجه اختلاف ضرایب انبساط حرارتی، احتمال پدید آمدن ترک در لایهٔ شیشه‌ای را بالا می‌برد. این ترک‌های اولیهٔ میکروسکوپی، در معرض گرادیان شدید دمای محیط (از ۷۰– تا ۱۲۰+ در ماهواره-ها) قرار می‌گیرند که باعث رشد و شکست لایهٔ شیشه‌ای و درنتیجه عملکرد نادرست سلول خورشیدی خواهند گردید [3].

در طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی، متغیرهایی مانند جنس لایهٔ شیشه‌ای، پارامترهای هندسی (طول، عرض و ضخامت لایه) و هم‌چنین وجود ترک اولیه نقش اساسی دارند. رشد زیاد ترک اولیه باعث تخریب کامل لایه می‌شود، بنابراین امکان به تعویق انداختن رشد ترک و افزایش عمر مفید لایهٔ شیشه‌ای دارای اهمیت به‌سزایی است.

در سال ۱۹۷۰ اولین سلول خورشیدی کاربردی از جنس گالیوم– آرسناید توسط آلفروف ساخته شد [4]. در سال ۱۹۸۹ سازمان فضایی آمریکا پژوهش‌های گسترده-ای در زمینهٔ سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک انجام داد و در سال ۱۹۹٤ اولین سلول خورشیدی را با راندمان بیش از ۳۰ درصد تولید کرد. از سویی دیگر، در سال ۲۰۰۷ رادو و پافومی به مطالعهٔ رشد ترک در یک بارگذاری حرارتی سینوسی پرچرخه پرداختند و به‌صورت تحلیلی مدلی را برای ارزیابی رشد ترک خستگی حرارتی پیشنهاد دادند [5]. سعادت و سرخیل در سال ۲۰۱۰ عمر خستگی و نرخ رشد ترک در اثر بارگذاری متناوب را به‌کمک معیار فورمن و مدل تعمیم‌یافتهٔ ویلنبرگ مورد بررسی قرار دادند [٦]. کتاری و همکاران در سال ۲۰۱۱ به‌روش اجزای محدود، رشد ترک خستگی در آهن ریخته‌گری را مطالعه کردند و نتایج را برای نمونه‌های بدون ترک اولیه و با وجود ترک اولیه منتشر کردند [7]. کادلک و همکاران در سال ۲۰۱۲ خستگی حرارتی و رشد ترک را در نمونه‌ای از فولاد زنگ‌نزن به‌صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند و ضرایب شدت تنش را برای این نمونه استخراج کردند [8]. در سال ۲۰۱۳ اوتز و همکاران، سازوکار شروع و رشد ترک تحت بارگذاری ترکیبی مکانیکی و حرارتی را بررسی کردند [9]. ژو و ینگ در سال ۲۰۱۸ به مطالعهٔ خستگی حرارتی دیسک‌های ترمزی پرداختند؛ مسیر رشد ترک ناشی از خستگی حرارتی را پیش‌بینی کردند و عمر خستگی دیسک را تخمین زدند [10]. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ مکانیسم آغاز و رشد ترک در سوپرآلیاژ DZ125 تحت بارگذاری حرارتی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج پیش‌بینی آغاز رشد ترک را ارائه کردند [11].

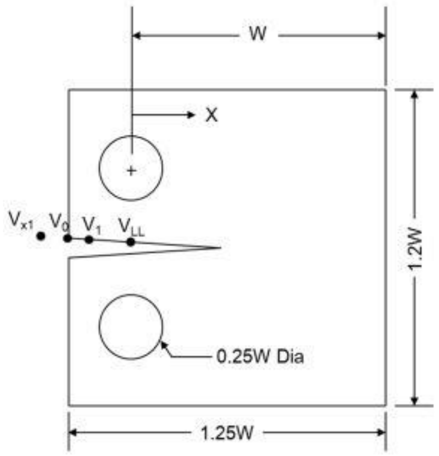
در این پژوهش باتوجه به نیاز صنعت برای استفاده از سلول‌های خورشیدی در کاربردهای فضایی، رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای یک سلول خورشیدی کامپوزیتی در اثر تغییرات دمایی شبیه‌سازی می‌شود. در خلال شبیه‌سازی‌های عددی، معادلات الاستیک و شکست ماده در زمان تغییرات دمایی به‌روش عددی و توسط نرم‌افزار آباکوس حل می‌شوند و متغیرهایی مانند تنش، زاویه و مسیر رشد ترک لایهٔ شیشه‌ای تعیین می‌گردند. هم‌چنین تأثیر متغیرهایی مانند ابعاد، ضخامت لایه، زاویه و مکان ترک اولیه بر روی رشد ترک بررسی می‌گردد.

شبیه‌سازی اولیه و اعتبارسنجی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی‌های عددی، ابتدا رشد ترک ناشی از خستگی در یک نمونه آزمون کشش فشرده شبیه‌سازی می‌شود و نتایج حاصل با نتایج عملی ارائه‌شده در تحقیقات پیشین مقایسه و اعتبارسنجی می‌گردد.

آزمون عملی مبنا برای شبیه‌سازی عددی

کیم و همکاران، مطابق شکل (۱) نمونه آلیاژ فولادی ۸٦۳۰ استاندارد را در آزمون کشش فشرده به‌صورت تجربی مورد بررسی و مطالعه قرار دادند [12]. در تحقیق فوق، شیاری به عمق ۲۲ میلی‌متر در وسط و ترک اولیه-ای به طول ۱۲ میلی‌متر در نمونه ایجاد شده‌است. هم-چنین بااستفاده از یک ماشین سرووهیدرولیک با حداکثر ظرفیت بارگذاری$\pm$۵۰ تن، نیروی ۱۸ کیلونیوتن با فرکانس۱۰ هرتز به نمونه اعمال گردیده‌است.



شکل ۱ نمونهٔ استاندارد آزمون کشش فشرده [9]

شبیه‌سازی عددی اولیه

آزمون کشش فشردهٔ نمونه آلیاژ فولاد ۸٦۳۰ مطابق مطالعهٔ تجربی کیم و همکاران [12] در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس شبیه‌سازی گردید. باتوجه به شکل (۱) قسمت پایینی نمونه کاملاً مقید گردید و نیروی چرخه‌ای به قسمت بالای آن اعمال شد. خواص مکانیکی ماده نیز مطابق جدول (۱) استخراج گردید [13]. هم‌چنین برای شبیه‌سازی رشد ترک، پارامترهای مادهٔ C و m مورد نیاز در قانون رشد ترک پاریس [14]، براساس مطالعات انجام‌گرفته توسط کیم و همکاران به‌ترتیب اعداد $^{-۱۱}$۱۰*۲/۱۷ و ۲/۵۷ اختصاص داده شد [12].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^{m} \qquad (۱)$$

جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژ فولاد ۸٦۳۰ [13]

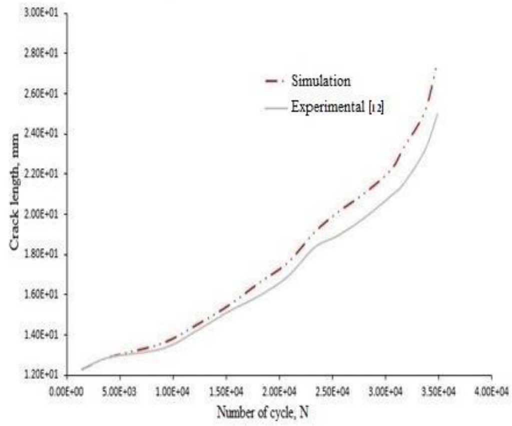
σ_f(MPa)	σ_u(MPa)	σ_y(MPa)	E (MPa)	ν
۳۱۵	٦۲۰	۵۵۰	۲۰۳	۰/۳

برای شبیه‌سازی‌های عددی رشد ترک بااستفاده از روش اجزای محدود تو سعه‌یافته، از معیار بیشینه تنش اصلی (Maximum principal stress) به‌دلیل دقت بالاتر در مقایسه با سایر معیارهای موجود در نرم‌افزار استفاده گردید [15]. هم‌چنین برای تحلیل از حلگر Direct cyclic و برای المان‌بندی هندسه از المان‌های S4 (A 4-node doubly curved general-purpose shell) استفاده شد. اگرچه در شبیه سازی‌های عددی به‌روش اجزای محدود توسعه‌یافته، اندازهٔ المان‌ها تأثیر زیادی بر روی نتایج ندارد اما حساسیت نتایج به اندازهٔ المان نیز مطالعه گردید و نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در اندازهٔ المان ۰/۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

مقایسهٔ نتایج عددی و تجربی

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، نتایج عددی شبیه‌سازی آزمون کشش فشرده برای آلیاژ فولاد ۸٦۳۰ حاصل

گردید. مطابق شکل (۲) نمودار طول ترک- تعداد چرخه استخراج می‌شود و با نمودار عملی مرجع [12] مقایسه می‌گردد.

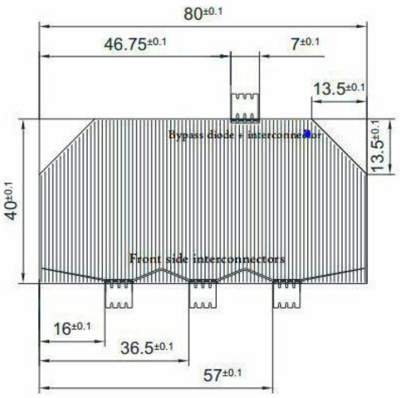


شکل ۲ مقایسهٔ نتایج عددی و تجربی رشد ترک در آزمون کشش فشرده

همان‌گونه که مقایسه نشان می‌دهد، شبیه‌سازی عددی رفتار رشد ترک اولیه و رسیدن به مقدار حداکثر را به‌خوبی دنبال کرد و از تطابق مناسبی با نتایج تجربی برخوردار است. مقدار خطای حداکثر نتایج شبیه‌سازی عددی ٤٪ است که برای تحلیل‌های عددی به‌روش اجزای محدود ناچیز و مورد قبول می‌باشد؛ بنابراین اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عددی به‌خوبی صورت گرفته‌است و باتوجه به نتایج استخراج‌شده از نرم‌افزار می‌توان رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای را با دقت مناسب مورد مطالعه و بررسی قرار داد.

شبیه‌سازی عددی رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای

در این قسمت بااستفاده از روش اجزای محدود توسعه‌یافته (XFEM) و رویکرد خستگی کم‌چرخه (LCF)، رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای محافظ یک سلول خورشیدی گالیوم- آرسناید شبیه‌سازی می‌شود و تأثیر پارامترهای مختلف در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. لایهٔ شیشه‌ای مذکور در معرض گرادیان دمایی بین شب و روز در شرایط فضایی قرار دارد. شکل (۳) ابعاد هندسی سلول خورشیدی گالیوم- آرسناید مورد نظر را نشان می‌دهد [16].



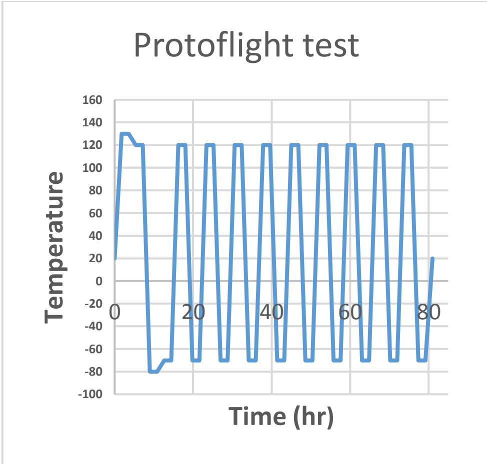
شکل ۳ هندسهٔ سلول خورشیدی گالیوم- آرسناید [16]

مطابق جدول (۲) خواص مکانیکی مورد نیاز لایهٔ شیشه‌ای با نام تجاری CMX100 از کاتالوگ شرکت سازنده استخراج و انتساب داده می‌شود [17]. طول ترک اولیهٔ ایجادشده بر روی لایه ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق به‌منظور رعایت ضریب ایمنی، برای شبیه‌سازی شرایط دمایی فضا از آزمون پروتوفلایت استفاده می‌شود. در این آزمون نرخ اعمال تغییرات دمایی به لایهٔ شیشه‌ای چند برابر شرایط فضایی است؛ بنابراین، چنان‌چه سلول تعداد مشخصی از چرخه‌های این آزمون را با موفقیت پشت سر بگذارد در شرایط فضایی نیز دچار مشکل خاصی نخواهد شد.

جدول ۲ خواص مکانیکی لایهٔ شیشه‌ای [17]

σ_{ut}(KPa)	G (N/m)	α	E (MPa)	ν
۳٤٦	٦۲۰	٦۵*۱۰$^{-٤}$	۱۵	۰/۲۱

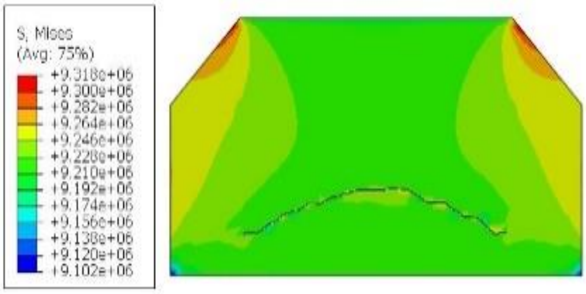
شکل (٤) تغییرات دما را برحسب زمان در آزمون پروتوفلایت نشان می‌دهد [18]. تغییرات دمایی فوق به لایهٔ شیشه‌ای اعمال شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی برای پارامترهای طول، مکان، زاویهٔ ترک اولیه، ضخامت و ابعاد لایه حاصل گردید.



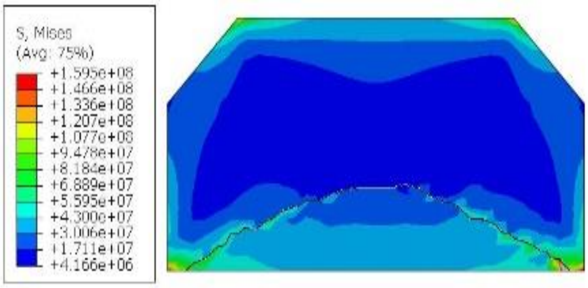
شکل ٤ تغییرات دما برحسب زمان در آزمون پروتوفلایت [18]

تأثیر طول ترک اولیه

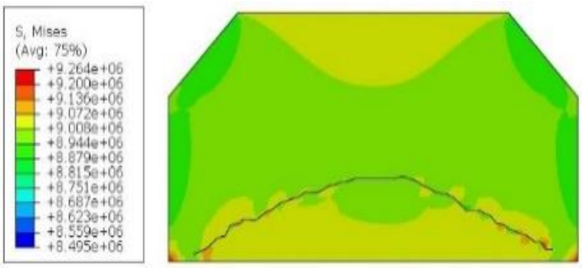
برای بررسی تأثیر اندازهٔ طول ترک اولیه بر روی روند کلی رشد ترک خستگی در لایهٔ شیشه‌ای، رشد ترک خستگی در نمونه‌هایی با ترک اولیهٔ مرکزی ۳، ۷ و ۱۰ میلی‌متری مطالعه گردید. شبیه‌سازی‌های عددی با طول ترک‌های اولیهٔ مختلف فوق انجام گرفت و میزان رشد ترک در تعداد چرخه‌های یکسان استخراج گردید. شکل‌های (٥) و (٦) روند رشد ترک و هم‌چنین مقایسهٔ نمودار رشد ترک- تعداد چرخه در نمونه‌های فوق را نمایش می‌دهد.



(الف)

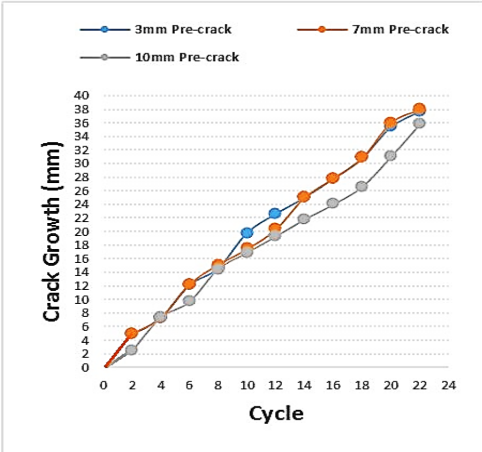


(ب)



(ج)

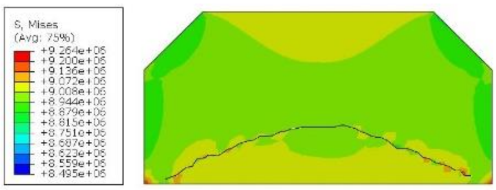
شکل ٥ روند رشد ترک در نمونه با ترک اولیهٔ مرکزی: الف) ۳، ب) ۷ و ج) ۱۰ میلی‌متری



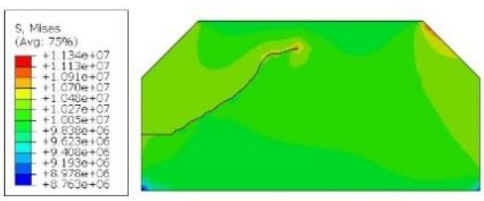
شکل ٦ مقایسهٔ روند رشد ترک با طول ترک‌های اولیهٔ متفاوت

تأثیر مکان ترک اولیه

به‌منظور مطالعهٔ تأثیر مکان ترک اولیه، دو نمونه با ترک اولیهٔ ۱۰ میلی‌متری یکی در لبه و دیگری در مرکز لایهٔ شیشه‌ای محافظ سلول خورشیدی شبیه سازی شد و میزان ر شد ترک در آن‌ها ا ستخراج گردید. روند ر شد ترک و هم‌چنین مقایسهٔ نمودار رشد ترک- تعداد چرخه در نمونه های فوق در شکل های (۷) و (۸) نمایش داده شده‌است. مطابق شکل‌های مذکور، اگرچه مکان ترک اولیه روندی متفاوت در رشد ترک از خود نشان می‌دهد اما تأثیر بسیار کمی در میزان آن دارد.

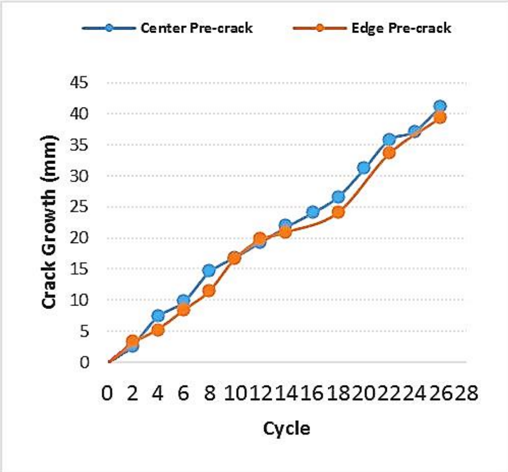


(الف)



(ب)

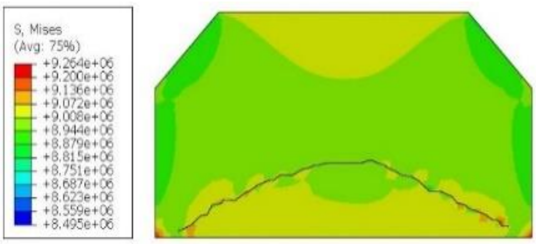
شکل ۷ روند رشد ترک در نمونه با ترک اولیه: الف) مرکزی و ب) کناری



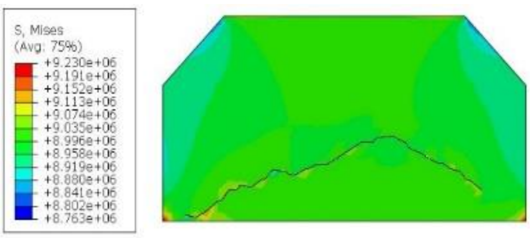
شکل ۸ مقایسهٔ روند رشد ترک با مکان ترک‌های اولیه متفاوت

تأثیر زاویهٔ ترک اولیه

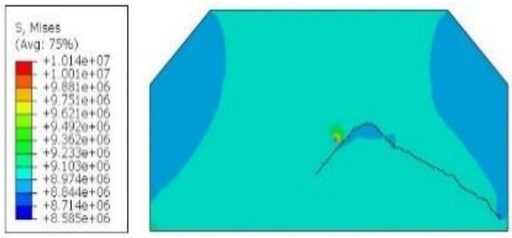
در این حالت، ترک اولیهٔ مرکزی ۱۰ میلی‌متری با زوایای صفر، ۳۰، ٤٥، ٦٠ و ۹۰ درجه شبیه‌سازی گردید. شکل‌های (۹) و (۱۰) روند رشد ترک و هم‌چنین مقایسهٔ نمودار رشد ترک- تعداد چرخه در نمونه‌های فوق را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اگرچه زاویهٔ ترک اولیه روندی متفاوت در رشد ترک از خود نشان می‌دهد اما تأثیر کمی در رشد ترک دارد.



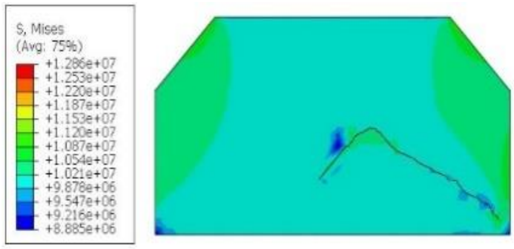
(الف)



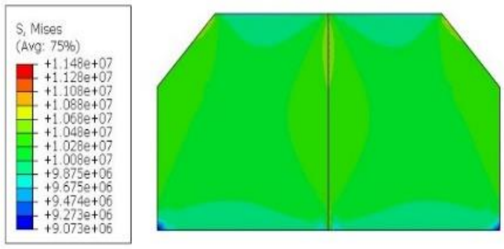
(ب)



(ج)



(د)

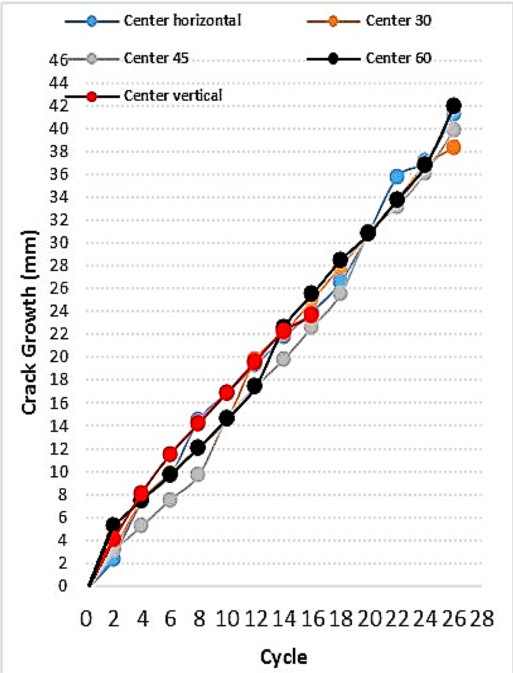


(ه)

شکل ۹ روند رشد ترک در نمونهٔ دارای ترک مرکزی با زاویهٔ: الف) صفر، ب) ۳۰، ج) ٤٥، د) ٦٠ و ه) ۹۰ درجه

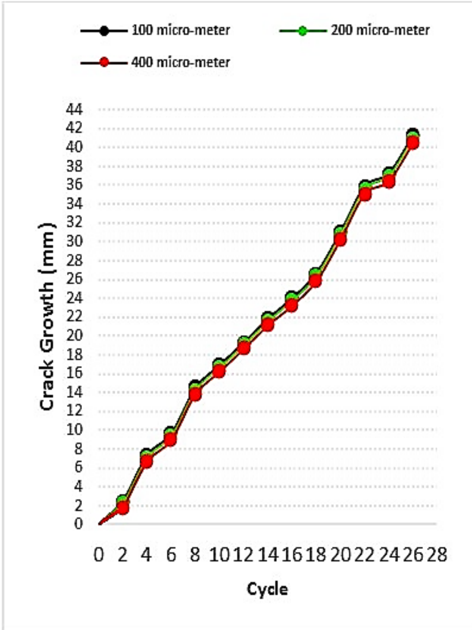
تأثیر ضخامت لایهٔ شیشه‌ای

در مواقعی که انرژی پلاستیک نوک ترک قابل اغماض نیست، پارامترهای دیگر مکانیک شکست (مانند انتگرال J و منحنی R) برای تعیین خصوصیات ماده مورد استفاده قرار می‌گیرند. داده‌های حاصل از آزمایش‌های دیگر به ضخامت نمونهٔ مورد آزمایش وابسته است و به‌عنوان خواص مشخصات واقعی ماده محسوب نخواهند شد. شرایط تنش صفحه‌ای در تمام پیکربندی‌های سازه صادق نیست؛ از این‌رو استفاده از مقادیر K_{IC} در طراحی نواحی نسبتاً نازک می‌تواند منجر به نتایج بسیار محافظه‌کارانه شود. در مواردی که حالت تنش واقعی به‌صورت صفحه‌ای باشد، به‌کارگیری داده‌های به-دست‌آمده از انتگرال J و نمودار R مناسب‌تر خواهد بود. این حالت برای شکست‌های آرام و پایدار (گسیختگی شکل‌پذیر) نسبت‌به شکست‌های سریع (شکننده) کاربرد بیشتری دارد.



شکل ۱۰ مقایسهٔ روند رشد ترک برای ترک مرکزی با زاویهٔ ترک‌های متفاوت

در پژوهش حاضر، با وجود این‌که شبیه‌سازی‌های عددی در حالت دوبعدی انجام گرفته‌است اما نرم‌افزار آباکوس این امکان را ایجاد کرده که بتوان با فرض‌کردن مسئله در حالت تنش صفحه‌ای، ضخامت را نیز اعمال کرد. برای بررسی تأثیر ضخامت بر رشد ترک، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی رشد ترک ناشی از خستگی حرارتی در نمونهٔ لایهٔ شیشه‌ای محافظ سلول خورشیدی با ضخامت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰ میکرومتر در شکل (۱۱) مقایسه می‌گردد. همان‌گونه که شکل تأیید می‌کند، ضخامت لایهٔ محافظ تأثیر خاصی بر روی میزان رشد ترک ندارد.

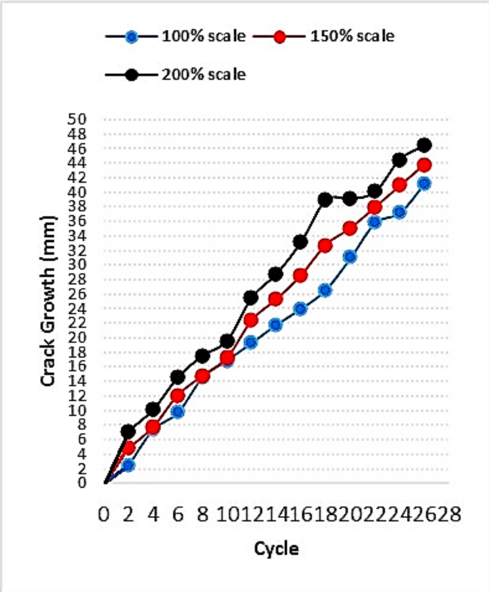


شکل ۱۱ مقایسهٔ روند رشد ترک برای لایهٔ شیشه‌ای با ضخامت‌های متفاوت

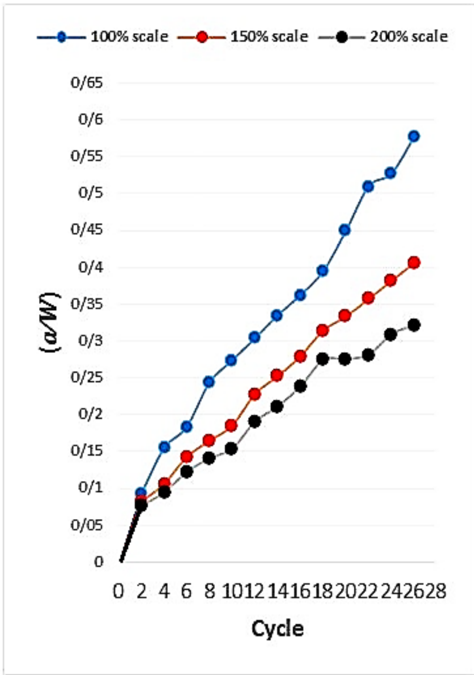
تأثیر ابعاد لایهٔ شیشه‌ای

به‌منظور بررسی تأثیر ابعاد، اندازهٔ لایهٔ محافظ سلول خورشیدی گالیوم- آرسناید در مقیاس ۱/۵ و ۲ برابر بزرگ شد و رشد ترک اولیهٔ ۵ میلی‌متری در آن بررسی گردید. شکل (۱۲) مقایسهٔ نتایج حاصل از شبیه سازی‌های مذکور را نشان می‌دهد. مقایسهٔ روند رشد ترک نشان می‌دهد که هرچه ابعاد لایهٔ محافظ بزرگ‌تر شود، رشد ترک نیز در آن افزایش می‌یابد. اگرچه طول ترک نهایی لایهٔ شیشه‌ای بزرگ‌تر در مقایسه با حالت اولیه (لایهٔ اولیه با ابعاد استاندارد) بزرگ‌تر است اما در مقایسه با ابعاد هندسهٔ جدید نگران‌کننده و بحرانی نیست. برای درک راحت‌تر این موضوع، مقایسهٔ نسبت طول ترک به قاعدهٔ بزرگ لایه برای هر سه مقیاس در شکل (۱۳) نمایش داده شده‌است.

مقایسهٔ فوق آشکار می‌کند که اگرچه در حالت ابعاد استاندارد، طول ترک کمتر است اما نسبت طول ترک به قاعدهٔ بزرگ در این حالت بیشتر از حالت‌های مقیاس بزرگ‌تر می‌باشد و درنتیجه رشد ترک در این حالت بحرانی‌تر از سایر مقیاس‌ها است.



شکل ۱۲ مقایسهٔ روند رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای با مقیاس ابعادی متفاوت



شکل ۱۳ مقایسهٔ نسبت طول ترک به قاعدهٔ بزرگ در هر مقیاس ابعادی

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

لایهٔ شیشه‌ای یکی از مهم‌ترین لایه‌های تشکیل‌دهندهٔ سلول خورشیدی است که گرادیان شدید دمای محیط (از ۷۰- تا ۱۲۰+ در ماهواره‌ها) را در یک شبانه‌روز تجربه می‌کند. متفاوت بودن جنس لایه‌ها و ضریب انبساط حرارتی آن‌ها، باعث پدید آمدن ترک، رشد ترک و در نتیجه شکست یا تخریب لایهٔ شیشه‌ای و هم‌چنین عملکرد نادرست سلول خورشیدی خواهد گردید؛ لذا بررسی امکان به تعویق افتادن رشد ترک و افزایش عمر مفید لایهٔ شیشه‌ای یکی از چالش‌های بسیار مهم در این زمینه می‌باشد. در این تحقیق رشد ترک در لایهٔ شیشه‌ای یک سلول خورشیدی کامپوزیتی در اثر تغییرات دمایی به‌کمک روش اجزای محدود توسعه‌یافته شبیه‌سازی شد و تأثیر متغیرهایی مانند طول، مکان و زاویهٔ ترک اولیه و هم‌چنین ضخامت و ابعاد لایهٔ شیشه‌ای مطالعه گردید. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای فوق، ابعاد لایهٔ شیشه‌ای محافظ بیشترین تأثیر را در رشد ترک دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشکدهٔ مواد و انرژی اصفهان در انجام تمامی مراحل تحقیق، تشکر و قدردانی می‌کنند.

واژه نامه

سلول خورشیدی	Solar cell
لایهٔ شیشه‌ای	Glass layer
گالیوم- آرسناید	Gallium-Arsenide
تغییرات دما	Temperature gradient
رشد ترک	Crack growth
عمر مفید	Useful life
روش اجزای محدود توسعه‌یافته	Extended finite element method (XFEM)
خستگی کم‌چرخه	Low cycle fatigue (LCF)
بیشینه تنش اصلی	Maximum principal stress

مراجع

1. Halo Industries, "Brittle Fracture Wafering of Silicon Ingots for Low Cost, High Efficiency c-Si Solar Cells", *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Vol. 09, Pp. 01-16, (2018).
2. Moss, S. J., Ledwith, A., "The Chemistry of the Semiconductor Industry", Springer, (1987).
3. Trapasso, L. M., "Temperature Distribution, in the Encyclopedia of Climatology", Springer, (1987).
4. Alferov, Z., "High Efficiency GaAs-Based Solar Cells Simulation and Fabrication", *A thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the PHD degree*, Ioffe Physico-Technical Institute, Vol. 01, Pp. 01-203, (1970).
5. Radu, V., Paffumi, E., "A Stochastic Approach of Thermal Fatigue Crack Growth (LEFM)", *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 03, Pp. 1031-1040, (2007).
6. سعادت، محمود، سرخیل، سعید، «بررسی تأثیر نسبت بیش بار در عمر خستگی نمونه به‌صورت عددی و تجربی»، *مجلهٔ مدل‌سازی در مهندسی*، دورهٔ ۸، شمارهٔ ۲۲، صص. ۵۸-۵۱، (۱۳۸۹).
7. Ktari, A., Haddar, N., Koster, A., Marie-Louise Toure, A., "Numerical Computation of Thermal Fatigue Crack Growth of Cast Iron", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 34, Pp. 498-509, (2011).
8. Kadlec, M., Hausild, P., Siegl, J., Materna, A., "Thermal Fatigue Crack Growth in Stainless Steel",

International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 98, Pp. 89-94, (2012).

9. Utz, S., Soppa, E., Silcher, H., Kohler, C., "Mechanisms of Crack Initiation and Crack Growth under Thermal and Mechanical Fatigue Loading", *39th Materials Testing Institute University of Stuttgart*, Vol. 39, Pp. 01-15, (2013).
10. Xue, G., Yang, Y., "Investigation on the Thermal Fatigue Life Evaluation Method of Railway Brake Disc with New Material", *Tehnički Vjesnik*, Vol. 25, Pp. 1095-1102, (2018).
11. Zhang, J., Zhao, Z., Kong, Y., Zhang, Z., Zhong, Q., "Crack Initiation and Propagation Mechanisms during Thermal Fatigue in Directionally Solidified Superalloy DZ125", *International Journal of Fatigue*, Vol. 119, Pp. 355-366, (2019).
12. Kim, S. K., Lee, C. S., Kim, J. H., Noah, B. J., Matsumoto, T., and Lee, J. M., "Estimation of Fatigue Crack Growth Rate for 7% Nickel Steel under Room and Cryogenic Temperature Using Damage-Couples Finite Element Analysis", *Metals*, Vol. 5, Pp. 603-627, (2015).
13. AISI 8630 Alloy Steel (UNS G86300).
14. Paris, P., Gomez, M., and Anderson, W. A., "A Rational Analytic Theory of Fatigue", *The Trend in Engineering*, Vol. 13, Pp. 9-14, (1961).
15. Nasrnia, A., Haji Aboutalebi, F., "Experimental Investigation and Numerical Simulations of U-Notch Specimens under Mixed Mode Loading by the Conventional and Extended Finite Element Methods", *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 88, Pp. 1461-1475, (2018).
16. Azur space product catalogue, "Triple Junction GaAs Solar Cell Assembly Type TJ Solar Cell Assembly 3G30A", (2019).
17. Qioptiq cover glass product catalogue, "Minimum Cover Glass Transmission Specifications with 0.10mm Thick CMX, CMG and CMO Glass Type", (2019).
18. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), "ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements and Standards", *Division Noordwyk*, Vol. 08, Pp. 97-113, (2008).

Numerical Simulation of Crack Growth in the Glass Layer of Gallium-Arsenide Solar Cell

Pouya Mokhtari[1] Farhad Haji Aboutalebi[2]

Hamid Beheshti[3] Mohammad Reza Ashraf Khorasani[4]

1. Introduction

A solar cell is a solid-state electronic component that directly converts a percentage of sunlight energy into electricity by its photovoltaic physicochemical effect. Space solar cells are mainly made of gallium-arsenide. The most important component of a solar cell is the glass layer, which is directly exposed to solar energy and experiences many temperature changes during the day and night. Due to the different coefficients of thermal expansion of different layers, cracking of the glass layer is possible. The presence of one or more primary microscopic cracks in this layer and the extreme ambient temperature gradient will lead to the crack growth, resulting in the failure or destruction of the glass layer, as well as improper functioning of the solar cell. In design and manufacturing solar cells, variables such as the material of the glass layer, geometric parameters (length, width and thickness of the layer) as well as the presence of initial cracks play a key role. The possibility of delaying the growth of the crack and increasing the useful life of the glass layer is of great importance.

2. Initial simulation and validation

In order to validate the results of numerical simulations, the crack growth due to fatigue in a compact tension (CT) test sample (Figure 1) was first simulated and the results were validated with the practical results of previous researches. The CT test of 8630 steel alloy sample was simulated in Abacus FEA software according to the experimental study of Kim et al. The mechanical properties of the material were also extracted according to Table 1. Due to higher accuracy, the maximum principal stress criterion was applied for numerical simulations of crack growth by the extended finite element method (XFEM). Also, the direct cyclic analysis and S4 elements (A 4-node doubly curved general-purpose shell) were employed.

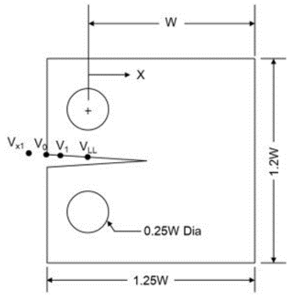


Figure 1. Standard sample of CT test

Table 1. Mechanical properties of 8630 steel alloy

$\sigma_f(MPa)$	$\sigma_u(MPa)$	$\sigma_y(MPa)$	$E\,(MPa)$	ν
315	620	550	203	0.3

The numerical and experimental results of the CT simulation for 8630 steel alloy are shown and compared in Figure 2 for the crack length-number of cycle diagram.

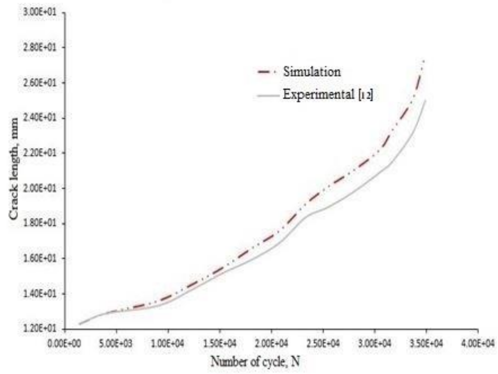


Figure 2. Comparison of numerical and experimental results of crack growth in CT test

3. Numerical simulation of crack growth in the glass layer

Crack growth exposed to the temperature gradient between night and day in space conditions in the glass layer of a gallium-arsenide solar cell was simulated and the effect of different parameters was investigated. According to Table 2, the mechanical properties of the CMX100 glass layer are extracted from the manufacturer's catalog.

Table 2. Mechanical properties of glass layer

$\sigma_{ut}(KPa)$	G (N/m)	α	E (MPa)	ν
346	620	$65*10^{-4}$	15	0.21

[1]. MSc. of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[2]. Corresponding Author. Associate professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: f.hajiaboutalebi@eng.ui.ac.ir.

[3]. Associate professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[4]. Instructor of Mechanical Engineering, Isfahan Materials and Energy Research Institute, Isfahan, Iran

In this research the protoflight test shown in Figure 3 was used to simulate the space temperature conditions.

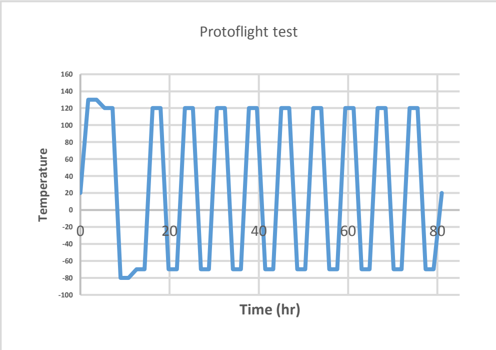


Figure 3. Variations of temperature vs. time in the protoflight test

3.1.The effect of initial crack length. To investigate the effect of initial crack length on the glass layer, crack growth was studied in a sample with a central initial crack of 3, 7 and 10 mm. Figure 4 shows the results.

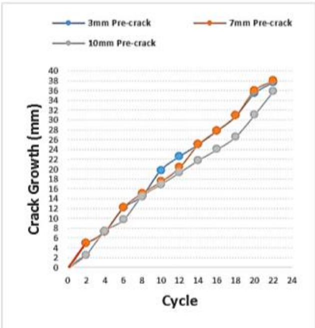


Figure 4. Comparison of crack growth trend with different initial crack lengths

3.2. The effect of initial crack location

Two samples were simulated with an initial crack of 10 mm, one at the edge and the other in the center of the glass layer of the solar cell, and the results are shown in Figure 5.

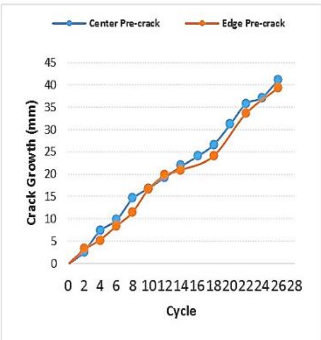


Figure 5. Comparison of crack growth trend with different initial crack locations

3.3. The effect of initial crack angle. In this case, the initial central crack of 10 mm with 0, 30, 45, 60, and 90 angles were simulated. Figure 6 shows the results.

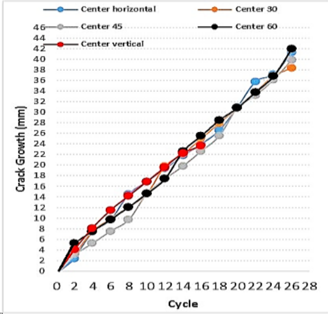


Figure 6. Comparison of crack growth trend with different angles

3.4. The effect of thickness of glass layer

To investigate the effect of thickness, the results of numerical simulations of crack growth in a sample of solar cell glass layer with thicknesses of 200, 100 and 400 μm are compared in Figure 7.

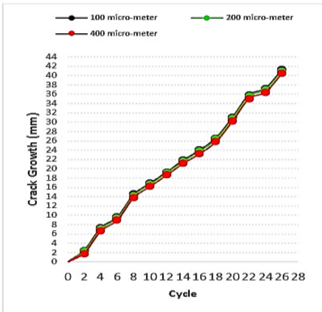


Figure 7. Comparison of crack growth trend with different thicknesses

4. Conclusion

Glass layer is one of the most important parts of the solar cell and experiences a strong ambient temperature gradient. The difference in the coefficient of thermal expansion will cause cracks, crack growth, and as a result, failure or destruction of the glass layer, as well as improper functioning of the solar cell. Therefore, delaying the growth of cracks and increasing the useful life of the glass layer is one of the most important challenges in this field. In this study, crack growth in the glass layer of a composite solar cell due to temperature changes was simulated using the XFEM and the effect of variables such as length, location, angle of initial crack, layer thickness, and dimensions were studied. The results revealed that among the above parameters, the dimensions of the protective glass layer have the greatest impact on crack growth.